

特高含水期 三角洲前缘储层 建筑结构分析与剩余油分布

赵红兵 申本科 著

石油工业出版社

特高含水期三角洲前缘储层 建筑结构分析与剩余油分布

赵红兵 申本科 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书综合应用层序地层分析法、高分辨率层序地层分析法、沉积体系分析法、层次界面分析法和结构单元分析法,最大限度应用计算机技术和手段,通过三角洲前缘内部构型解剖及三维构型建模,研究了三角洲前缘储层建筑结构模型、空间分布及储层非均质性、隔夹层成因和构型模式,建立了三角洲前缘砂体内部构型,揭示了三角洲前缘储层宏观、微观剩余油形成机理、控制因素及宏观、微观剩余油分布规律和模式。

本书可供从事油藏地质、油田开发研究人员及高等院校相关专业师生参考和阅读。

图书在版编目(CIP)数据

特高含水期三角洲前缘储层建筑结构分析与剩余油分布 / 赵红兵, 申本科著.
北京: 石油工业出版社, 2011.3

ISBN 978-7-5021-8166-6

I. 特…

II. ①赵…②申…

III. ①三角洲相—油气—储集层—建筑结构—结构分析

②三角洲相—油气—储集层—剩余油—分布

IV. P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 242872 号

出版发行: 石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址: www.petropub.com.cn

发行部: (010) 64523620

经 销: 全国新华书店

印 刷: 石油工业出版社印刷厂

2011 年 3 月第 1 版 2011 年 3 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 10.25

字数: 258 千字 印数: 1—1000 册

定价: 48.00 元

(如出现印装质量问题, 我社发行部负责调换)

版权所有, 翻印必究

前言

油气是工业的“血液”，是国民经济发展的支柱，科学地解剖油气田储层结构对滚动勘探开发有着重要的理论意义和实用价值。

我国油田开发目前正面临着从易开发区向难开发区和边远地区，从部分高含水向全面进入高含水、特高含水、高采出程度，从储采基本平衡向严重不平衡过渡的严峻形势。东部油气田的储量和产量占全国油气储量和产量的一半以上，且广泛发育分布在受同生断裂控制的陆相断陷湖盆中，这些油气田的储层主要为非均质性的河流、三角洲相沉积，给油气田的勘探开发带来了极大的困难，要求对储层进行更加全面、深入的研究。目前这些油气田已经历 30~40 余年注水开发，其中多数油田都进入了高含水或特高含水开发阶段，油田综合含水率为 95%，但油气采收率仅为 30%~40%，地下油水分布情况发生了巨大的变化，呈现出高度分散，局部集中，剩余油多分布在差、薄、边部位，开采难度增大等新特点，而这些特点主要是由于储层的各种非均质性 & 复杂的构造断层切割所造成的。因此，为了搞清特高含水期老油田地下剩余油分布规律，进一步提高滚动勘探开发工作水平，需要更加精细地解剖储层结构和预测井间砂体及各种油藏参数的分布规律，建立精细的三维定量预测地质模型。传统的地质研究方法已不能满足现在的需求，发展一套适应开发中晚期的现代储层建筑结构解剖技术，是深度开发老油田、提高采收率的基础和关键。

储层建筑结构分析的关键是建立储层骨架模型，建立储层骨架模型的基础则是正确的地层对比。源于被动大陆边缘的层序地层学，依据地层沉积时的海（湖）平面变化，综合地层内部的相互关系，对地层进行等时划分和对比，自然成为建立储层地层格架的首选技术。基于非海相地层沉积的控制因素及跨相带的储层对比，Cross 提出了基于基准面的高分辨率层序地层学，该理论依据基准面变化中的过程—沉积响应，分析沉积过程中沉积物体积分配及与其相伴生的相分异，为预测储层的空间及其非均质性提供了新思路，在国内外产生了广泛的影响，被认为是储层表征的发展方向。沉积体系分析突出了大型沉积体的空间关系、沉积体内部和外部几何形态的研究，是环境和形态的统一，不仅理论体系完善，而且能更有效地应用于生产实践。层次界面分析方法强调了从系统论的观点出发研究系统本身具有的层次性和结构性，强调沉积的等时性和间断性，因此向上与层序地层学兼容，向下可无穷细分而始终与沉积成因分析相吻合。结构单元分析对砂体内部不同级别的构成单元、各级界面和薄夹层类型做精细的划分，目前除了领先研究的河流砂体外，这次重点研究三角洲前缘储层的建筑结构。

本书分为 7 个部分，绪论主要介绍三角洲前缘储层建筑结构分析的意义、储层建筑结构的研究现状、三角洲前缘储层剩余油研究现状及本书的特色与主要成果。第一章介绍胜坨油田的地层格架、构造特征及演化、沉积体系、油气藏类型及分布和目前开发现状。第二章论述了 5 种储层建筑结构分析理论和研究方法——层序地层分析法、高分辨率层序地层分析法、沉积体系分析法、层次界面分析法和结构单元分析法。第三章通过层序和高分辨率层序对比方法、三角洲前缘基准面旋回识别及储层精细对比，论述了三角洲前缘高分

辨率层序地层格架的建立。第四章论述了胜坨油田沙二段 8 砂组三角洲类型的确定, 三角洲前缘沉积微相类型、特征、沉积模式和演化特征。第五章通过三角洲前缘储层层次界面分析, 河口坝结构单元分析、内部构型解剖及三维构型建模, 阐述了三角洲前缘砂体内部构型分析。第六章论述了三角洲前缘储层宏观、微观剩余油形成机理、控制因素及宏观、微观剩余油分布规律。

本书是在胜坨油田勘探开发实践和理论方法的基础上, 通过深入研究后归纳编写而成的。在编写过程中得到中国石化胜利油田采油厂、中国石油大学(北京)、中国石化胜利油田地质科学研究院、中国石化石油勘探开发研究院及中国石油勘探开发研究院等单位领导及专家的热情帮助和指导, 在此表示衷心的感谢。

目 录

绪 论	1
第一章 胜坨油田石油地质概述	7
第一节 地层格架	7
第二节 构造格架及演化	11
第三节 沉积体系	16
第四节 油藏类型及分布	26
第五节 开发现状	29
第二章 储层建筑结构分析的理论基础和研究方法	32
第一节 层序地层分析	33
第二节 高分辨率层序地层分析	36
第三节 沉积体系分析	45
第四节 层次界面分析	50
第五节 结构单元分析	55
第三章 三角洲前缘高分辨率层序地层格架的建立	63
第一节 高分辨率层序对比方法	63
第二节 三角洲前缘基准面旋回识别	69
第三节 三角洲前缘储层精细对比模式	73
第四节 精细地层对比方法及结果	79
第四章 三角洲前缘沉积特征	87
第一节 三角洲类型的确定	87
第二节 三角洲前缘沉积微相类型及特征	89
第三节 三角洲前缘沉积模式	97
第四节 三角洲前缘沉积演化特征	101
第五章 三角洲前缘砂体内部构型分析	103
第一节 三角洲前缘储层层次界面分析	103
第二节 三角洲前缘河口坝结构单元分析	110
第三节 三角洲前缘河口坝内部构型解剖	115

第四节 三角洲前缘河口坝构型三维建模	122
第六章 高含水期三角洲前缘储层剩余油分布状况及形成机理	131
第一节 剩余油分布状况	131
第二节 三角洲前缘剩余油形成机理	140
第三节 剩余油挖潜建议	150
参考文献	152

绪 论

我国油田多为陆相沉积，储层的层间、层内和平面上渗透率变化大，注入水往往沿高渗透率带推进，造成水驱波及体积小，注入水过早向油井突进。加上我国油田原油性质多属中、高黏度，油水黏度比值一般高于 20 以上，形成较强的水驱油非活塞性，进一步加剧了注入水的舌进。另外，在开发方式上，多采用早期内部注水保持压力开发，水驱强度大。上述因素主导了我国油田注水开发的基本规律：注水开发早、中期含水上升快，相当多的可采储量要在高含水期采出。根据水淹层测井解释和密闭取心分析，我国老油田高含水期水淹程度的不均匀性十分严重，如大庆油区喇萨杏油田的北一区断西主力油层葡 II - 4，经过 27 年注水，在综合含水已高达 90.7% 的情况下，49 口井水淹层测井解释结果表明，平均水淹厚度占总油层厚度的 62.8%，其中高含水厚度仅为 28.2%，另外 37.2% 的油层还未见水；中区西部中等渗透率油层萨 II 1 - 3，1960 年投入注水开发，1987 年新钻 13 口井水淹层测井解释，未水淹厚度占总油层的厚度高达 61.6%；胜利油区埕东油田已进入特高含水阶段，在含水 92.8% 的情况下，油层水洗厚度仅占总油层厚度 54%。因此，不论从理论上还是从油田开发实践上看，我国油田高含水期采油是一个重要而漫长的开发阶段。

截至 1995 年底，全国油田综合含水率已高达 81.36%，可采储量采出程度为 65.33%，仍有约 35% 的可采储量需在高含水期开采。随着油田开发的不断深入，油田综合含水率将进一步增高，“十一五”以后，将面临老油田产水量大幅度增加、经济效益越来越差的局面。因此，搞清高含水期老油田储层非均质特征和剩余油分布特征，是亟待解决的重大问题。

一、三角洲前缘储层建筑结构分析的意义

三角洲储层是我国已发现油田主要的储层类型，也是我国油气最富集的储油层之一。我国东部各油田中，三角洲储层在各类碎屑岩储油层中占有重要比例，石油地质储量占我国已开发油田动用储量的 32.6%（俞启泰等，1999）。三角洲沉积储层内部结构复杂，储层平面及纵向上的非均质性强，给油田高效开发带来极大困难，同时也蕴含着较大的剩余油潜力。据徐安娜等对我国（15 个主要油区 71 个油田，占全国已开发 315 个油田的 20%，占已开发总储量的 70.4%）不同类型碎屑岩储层中可动用剩余油分布概率研究表明，三角洲储层内不但存在较多可动用剩余油，而且是其中潜力比较大的，仅次于河流相储层。

胜利油区胜坨油田发育典型的河控三角洲沉积体系，是胜坨油田的主要含油层系，其储量占胜坨油田总储量的 44.21%。经过 40 多年的注水开发，胜坨油田三角洲前缘油藏已进入特高含水开发后期，采出程度已达 38.9%，综合含水高达 95% 以上，水驱动用情况复杂，挖潜难度大。油田开发对象已由早期的油层组到中期的小层乃至如今的单层、单砂体；开采的主要矛盾已由层间矛盾转化为如今的层内乃至砂体内部建筑结构之间的矛盾；原有的地质模型已难以适应开发的需要，迫切需要开展更加精细的储层内部层次结构研究，深化对三角洲前缘储层非均质性的认识，为定量研究剩余油分布规律、改善油藏开发效果提供依据。

二、储层建筑结构研究现状

储层建筑结构研究属于一种储层分级次研究方法,目前仍处于不断发展的过程中。此项技术引入国内之前,旋回对比、分级控制是国内油田地质工作者广泛采用的储层研究技术之一。然而,在油田开发中后期,油田地质静态与动态资料间的冲突日益加深,说明依据这一方法所建立的储层格架与油田开发动态间具有一定的矛盾。另外,该方法忽略了储层的沉积过程,只是依据旋回及测井曲线的相似程度进行地层的对比,而没有从最根本的沉积过程响应来解决沉积地层的空间展布,导致地层对比结果往往存在穿时现象,难以满足油田开发中后期调整及剩余油挖潜的需要。

高分辨率层序地层学以沉积过程响应动力学为理论基础,通过对沉积过程中基准面的变化和沉积物供给特征的分析,利用 A/S 值和基准面旋回进行地层划分和对比,预测砂体的空间展布及其非均质性特性。自该理论引入国内后,受到了石油地质工作者的重视,开展了多方面的研究工作,应用资料涉及露头、地震、岩心和测井,应用领域涵盖了石油勘探与开发。高分辨率层序地层学虽然在地层层序划分和对比上提高了分辨精度,但由于它是在相控基础上进行的地层划分和对比,最小层次的短期旋回并不代表垂向上单一的沉积环境(或成因砂体)变化,而是由若干呈渐变的微相(或成因砂体)组成,因此,其分辨率在某种程度上仍不能满足油田高含水后期开发地质的高精度要求。

1985 年以来,Andrew D.Miall 和 Douglas W.Jordan 等人分别提出了用沉积界面和结构要素分析法(Architecture Element)分层次研究露头和现代沉积中河流相砂体的成因类型、内部建筑结构和非均质等级的思想。1990 年第十三届国际沉积学大会上明确指出研究砂体几何学、内部建筑结构、不渗透薄夹层分布及渗透率的空间变化是储层非均质的主要内容,并且认为研究沉积界面体系(界面层次或界面等级)是搞清砂体内部建筑结构的关键,各种不渗透夹层往往都与不同级次的沉积界面相关联。

1. 建筑结构研究的主要内容

Miall 提出的建筑结构单元分析就是结合古水流数据对露头横剖面进行岩石相、界面和建筑结构单元的划分,以揭示沉积体系的三维展布,恢复沉积体系的演化史,它是目前研究露头沉积地质的最佳方法之一。其研究流程包括:露头剖面的建立、岩石相划分、古水流分析、界面划分、结构单元划分等。其中,界面和结构单元的划分是研究的关键所在。

Miall 定义结构单元为沉积体系的一个构成部分,它在大小上等于或小于河道充填,但比单个岩石相单元大,并以不同的岩石相组合、内部几何形态、外部几何形态和垂向剖面(在某些实例中)为特征。结构单元这个术语所指的地层单元以 3 级到 5 级界面为界。而且,由于结构单元分类是描述性的成因分类,因此进行结构单元划分时应注意上、下界面的性质、外部几何形态、尺度、岩性、内部几何形态及古水流模式等。

Miall 归纳出河流沉积中的经典的 9 类基本结构单元:河道(CH);砾石坝和底形(GB);砂质底形(SB);向下游增生大底形(DA);侧向增生大底形(LA);越岸细粒(FF);沉积物重力流(SG);纹层沙席(LS);冲蚀凹坑(HO)。

2. 地下储层建筑结构研究现状

在 Miall 结构单元分析法的基础上,国内众多学者开展了大量工作,总体上是在 Miall 的基础上,结合不同类型储层特点,建立不同沉积体系的储层建筑结构地质模型。

其中,对于曲流河储层建筑结构的研究较为深入,研究成果较多,较为典型的是李

阳等对孤岛油区馆上段曲流河的储层建筑结构研究。李阳等在岩心观察的基础上,根据 Miall 的岩相分类方案,把孤岛油区馆上段曲流河岩相细分为 11 种类型,确定了岩心中 1~6 级界面的划分方案。根据不同的岩相组合、内部几何形态、外部几何形态、界面性质及剖面特征划分出河道滞流沉积 (CHL)、侧向加积沙坝 (LA)、天然堤 (LV)、决口扇 (CS)、决口水道 (CR) 和洪泛平原细粒 (FF) 等结构单元。

辫状河储层建筑结构的研究也取得了一些进展,以胜坨油田沙二段 3₄ 小层辫状河砂体为例,根据取心井岩心观察识别出 13 种岩相类型。通过岩心观察、连井剖面对比和测井曲线识别,采用层次分析的思路定义了 6 级界面。在岩相类型识别和结构界面划分的基础上,定义了辫状河流沉积的 7 种结构要素:河道充填、河道滞留沉积、心滩、落淤层、天然堤、决口扇和越岸细粒沉积。

三角洲前缘储层建筑结构的研究成果相对较少,有学者分别从水下分流河道、前缘席状砂、河口坝等单一沉积相带的角度阐述了储层建筑结构研究方法。其中,何文祥等以济阳坳陷东营凹陷胜坨油田胜二区沙二段 8 砂层组为例,综合应用高分辨率层序地层学理论和储层建筑结构分析法,对河口坝建筑结构开展的研究较有特色。通过层次分析,将河口坝分为 3 种级次:河口坝复合体、单一河口坝、河口坝内增生体,建立了河口坝储层建筑结构模式。

3. 储层建筑结构研究发展趋势

建筑结构单元分析法最早是用于地面露头研究,地面调查可以进行到足够详细的程度,但在应用测井曲线和少量取心资料进行地下储层分析时,必须建立适用于地下对比的界面系列及其划分标准。一般来说,常规测井方法很难识别出纹层规模和层系级的界面;另一方面,界面划分过于详细则误差随之增加,增加了工作中的难度。建筑结构要素类型应当能够通过井筒信息进行预测并定量分析,从而有效地预测不同类型隔挡层的空间分布及规模。

储层建筑结构研究中,界面系列和要素的种类应当是一个开放的体系,需结合所研究地区的特点以及研究对象的复杂程度自行排列界面序列、定义结构要素类型。但界面系列必须是一个以沉积过程为依据的谱系,要素类型必须反映特定的沉积方式和沉积能量,具有一定沉积特征。

三角洲前缘储层建筑结构单元分析相对于河流沉积类型的储层研究程度相对较低,总体上还处于概念模型和框架模型的阶段,需进一步建立基于取心井和密井网资料的地下储层研究方法和技术流程,精细刻画河口坝增生体等 3 级界面限定的结构要素特征,建立真实反映厚层内部非均质性的建筑结构模式。

三、三角洲前缘储层剩余油研究现状

剩余油研究包括宏观剩余油和微观剩余油研究,目前都是世界性学科前沿的难题,已经成为国际学术会议,如世界石油大会、国际储层表征会议以及 SPE、AAPG 等专业性年会讨论的重要主题之一,在 SPE 文献中,有关剩余油研究的文章连年增加。

1. 剩余油分布一般规律

国内外大量的研究表明,油藏中剩余油分布形式与数量如下:①存在于注水过程中水未洗到的低渗透夹层中或者是水绕过的低渗透带中的剩余油约占 27%;②由于地层

压力梯度小,在油不流动的油层(滞留带)中存在的剩余油占 19.5%;③未被井钻到的透镜体中的剩余油占 16%;④在一些小孔隙中被毛细管力束缚的剩余油占 15%;⑤以薄膜状的形式存在于储层岩石表面上的剩余油占 13.5%;⑥局部不渗透的遮挡处(如封闭性断层等)的剩余油占 8%。

研究表明,高含水油藏宏观上剩余油主要分布在注入水未波及的或者波及程度比较低的部位;微观上主要受储层润湿性、油藏流场演变和驱油效率低等因素影响,剩余油形成与分布主要受沉积相、微构造、储层非均质性、润湿性及井网条件等综合因素的控制。剩余油主要分布在:①边缘相带,如河床边缘、堤岸相带、边边角角、低渗透差储层或表外储层;②封闭性断层或低序级断层附近、构造高部位与微构造起伏的高点;③正韵律厚层的上部;④井间分流线、井网控制不住、注采系统不完善的部位等。

总体上看,当前对于剩余油分布规律的认识有简单化的趋势,特别是对于深度开发油藏,剩余油的形成与分布极为复杂,目前在认识上还未形成突破。

2. 剩余油研究方法

目前剩余油分布的研究主要分为宏观分布研究和微观分布研究两部分。

宏观剩余油研究的原理和方法:①油藏数值模拟法。该方法主要是研究油层饱和度,它不仅计算整个油层中饱和度在空间上随时间的变化,同时也可以预测未来饱和度的变化。②物质平衡法。应用物质平衡法能获得水驱结束时的剩余油饱和度。③水驱特征曲线法。根据现场实际生产资料中的累积产油和产水量及油藏地质储量,算出油藏采出程度;再根据目前剩余油饱和度表达式 $S_{or} = S_{oi}(1 - R)$ 可算出油田各区块的平均剩余油饱和度。④动态分析方法。主要是根据油田生产的各种数据及其测试资料进行剩余油研究的直接而简便的方法。⑤沉积相方法。这种方法在我国得以普遍应用,主要是因为我国大多数油田储层属于陆相的河流三角洲沉积。⑥检查井研究方法。该方法主要是利用油基钻井液取心、密闭取心、大直径取心及水淹层取心等来研究剩余油的分布。⑦开发地震技术。在过去的 10 多年里,地震采集技术和数据处理与成像技术取得了重大进展。⑧测井解释技术。一方面是对常规测井资料进行组合分析解释,用测井资料求出地层水、束缚水和残余油饱和度,然后根据多相流体在微观孔隙内的渗流特性和规律及油水共渗分流量方程,求出剩余油饱和度、含水率,并划分水淹等级;另一方面是采用一些特殊的测井技术,如时间推移测井、“测—注—测”方法及碳氧比能谱、PND、RST、MDT 等井间监测方法等。

微观剩余油研究的原理和方法:①孔隙结构及微观驱替机理研究。既可模拟驱替过程,也可运用岩心切片观察剩余油在孔隙中的分布规律。②剩余油物理化学场研究。其主要的原理是因原油性质为非均质,注入水常携带细菌、有机酸、氧和矿物氧化剂,原油与注入水的相互作用,水驱后的剩余油常被氧化,使原油黏度增高、密度增高、分子量更大。③微观物理模型研究。目前这类研究主要有两个方面:一是利用理想的孔隙模型进行剩余油驱替机理及影响因素的研究;二是根据实际油藏的岩心及孔隙结构,建立微观仿真模型,进行驱替实验,直接指导油田的开发工作。④图像处理技术。近几年开发出的含油薄片和光刻仿真微观模型的图像处理技术,专门用于研究剩余油在孔隙结构网络里的形成机理、分布特征及产状。将这种技术与其他资料(压汞、铸体薄片、相渗透率、X 射线衍射、电镜、岩矿鉴定、沉积相及其他地质特征研究成果等)结合,可以共同评价储层性质,为注水开发后期剩余油的分布特征研究提供一种新的定量分析方法。

从根本上看,剩余油研究不仅仅单纯依赖于各种研究方法,更重要的是将各种研究方法与符合油藏实际的地质模型相结合,从而取得正确的研究结论。

3. 三角洲前缘储层剩余油分布

胜坨油田是一个石油地质储量近 $5 \times 10^8 \text{t}$ 的特大型整装砂岩油气田,具有油源丰富、油气封存条件好、含油层系多的特点。自 1963 年勘探发现以来,已经历了 40 多年的勘探开发,到 20 世纪 90 年代初,进入特高含水开发时期。为了搞清油层在特高含水期的水淹状况及剩余油分布特征,自 1996 年以来,针对胜坨油田三角洲前缘沉积储层,胜利采油厂先后与多所高校和研究所开展过油藏描述、地质建模及数值模拟研究,取得了丰富的油藏描述成果,指导了油田中、高含水阶段的开发生产。

研究表明,特高含水期三角洲前缘沉积砂体受储层沉积及非均质特征影响,平面、层间水驱动用状况差异较大,河口坝主体砂体水驱油效率高,剩余油主要分布在砂体顶部,河口坝侧缘及远沙坝沉积砂体剩余油分布受隔夹层控制,主要集中在低渗透率条带韵律层中。

上述关于三角洲前缘剩余油分布的研究成果同样存在简单化的问题,存在以下几点缺陷:

(1) 未应用现代沉积学理论开展三角洲前缘隔夹层的成因及三维展布研究,对于砂体内部建筑结构的认识模糊;

(2) 研究成果仅分析了沉积微相对剩余油的控制作用,对韵律层内部的结构没有做进一步的解剖,且数值模拟基于的地质模型是以韵律层为模拟单元而粗化的拟三维模型,并非真正意义上的三维建筑结构模型,不能对厚油层内部的剩余油分布做出准确预测,亦不足以指导层内剩余油的挖潜;

(3) 并未系统地总结渗流屏障及渗流差异对剩余油分布的控制作用。

总体上看,当前对于三角洲前缘储层剩余油分布的研究还有待进一步深化,研究的重点是如何精细刻画储层内部建筑结构的特征,建立基于储层建筑结构的油藏地质模型,并在此基础上开展剩余油分布研究。

四、研究特色及主要成果

本书在前人研究的基础上,将储层建筑结构研究的理论和方法系统引入地下三角洲前缘沉积储层研究,利用密井网测井资料、取心资料、高精度三维地质资料、动态监测资料、开发动态资料,深入开展了三角洲前缘高分辨率地层格架、沉积体系、沉积特征沉积结构单元研究,揭示了三角洲前缘河口坝储层建筑结构与特高含水期剩余油分布规律和形成机理,主要研究特色和成果如下:

(1) 经过详细调研和分析,确定胜坨油田二区沙二段 8 砂组为吉尔伯特型三角洲前缘沉积;运用高分辨率层序地层学和三角洲沉积学理论指导精细地层对比,建立了高精度等时地层格架。

(2) 将三角洲前缘划分为坝后、坝主体、坝缘(包括远沙坝和坝侧缘)、坝间、水下分流河道微相,建立了三角洲前缘沉积模式。

(3) 运用层次分析法系统开展了河口坝储层建筑结构解剖,认为 4 级界面处的隔层是渗流屏障,3 级界面处的夹层具有一定的渗透性,相对低渗,但能起一定的渗流遮挡作用。

(4) 油田开发中后期, 储层建筑结构单元及建筑结构界面对剩余油的控制作用明显。建筑结构单元的韵律性与建筑结构界面的空间分布可单独对剩余油分布起控制作用, 二者相匹配使地下剩余油的分布更复杂。建筑结构单元间的渗流差异和建筑结构界面引起的渗流屏障是地下剩余油富集的根本控制因素。

(5) 根据地下剩余油的分布状况, 结合概念模型数值模拟, 总结了三角洲前缘的 7 种剩余油分布模式: 顶部富集型、均匀驱替型、底部富集型、界面之上富集型、界面之下富集型、界面上下富集型和界面侧向遮挡型。

(6) 根据剩余油的分布模式提出了相应的挖潜措施。

第一章 胜坨油田石油地质概述

胜坨油田位于山东省东营市垦利县境内，构造位置处于济阳坳陷东营凹陷中央隆起带北侧（图 1-1）、坨庄—胜利村—永安镇断裂构造带的西段。北面为陈家庄凸起，东面与垦东、青坨子凸起相临，两凸起均系花岗片麻岩的古凸起；西南面为利津生油洼陷，南与中央隆起带的东辛油田相连。胜坨油田是胜北大断层下降盘上的逆牵引背斜构造，东西长 15km，南北宽 4.0 ~ 7.0km，具有优质生油区和丰富的物源供给区，而且又具有良好的油气封闭条件，是一个油源、物源均丰富的含油气区。

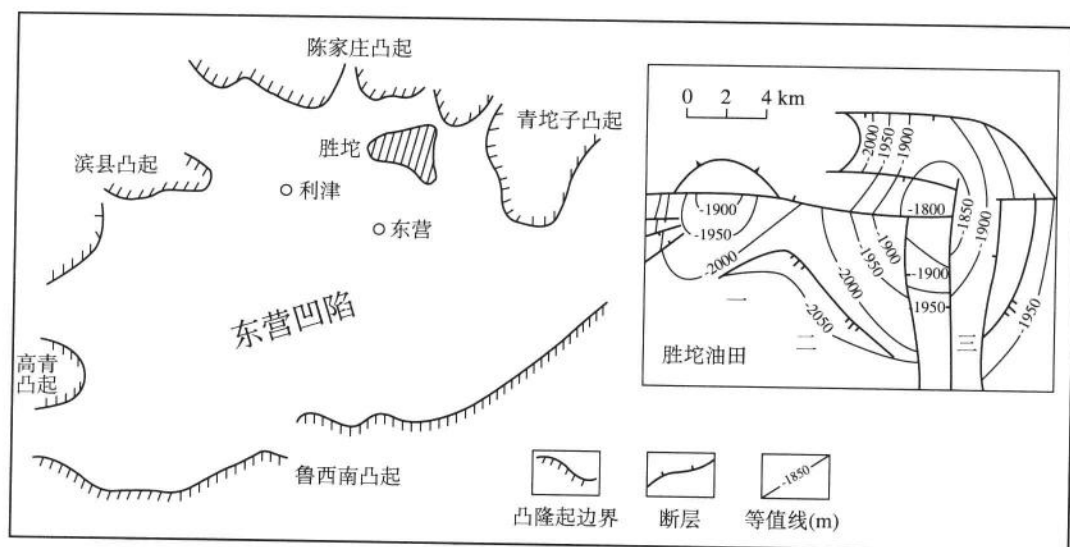


图 1-1 胜坨油田区域位置图

第一节 地层格架

一、地层层序

胜坨油田的地层纵向上包括震旦系、寒武系花岗岩基底和上覆新生界古近系—新近系、第四系地层。按岩石地层划分，自下而上依次为：古近系沙河街组（细分为沙四段、沙三段、沙二段、沙一段）、东营组，新近系馆陶组、明化镇组，第四系平原组（图 1-2）。目前胜坨油田发现的油气集中分布在古近系—新近系地层中。

古近系—新近系地层受构造运动的影响，从下到上可划分为 4 个沉积旋回期，即沙四段沉积旋回期、沙三段—沙二段沉积旋回期、沙一段—东营组沉积旋回期和馆陶组—明化镇组沉积旋回期。

在沙四段沉积旋回期，盆地处于初始断陷期和深陷初期，以强烈的基底沉陷为特征。在胜坨地区北部陡坡带发育冲积扇、三角洲及浊积扇三大沉积体系。在西北部远离湖岸的

地区，以陆上冲积扇体沉积为主。到沙四晚期，伴随济阳运动 I 幕发生，随着断裂活动的加剧，古地貌地形高差逐渐加大，湖盆水体加深，湖岸线继续向北扩大，除形成冲积扇体和水下扇体外，还在深湖区同生断层的下降盘发育了浊积扇体。

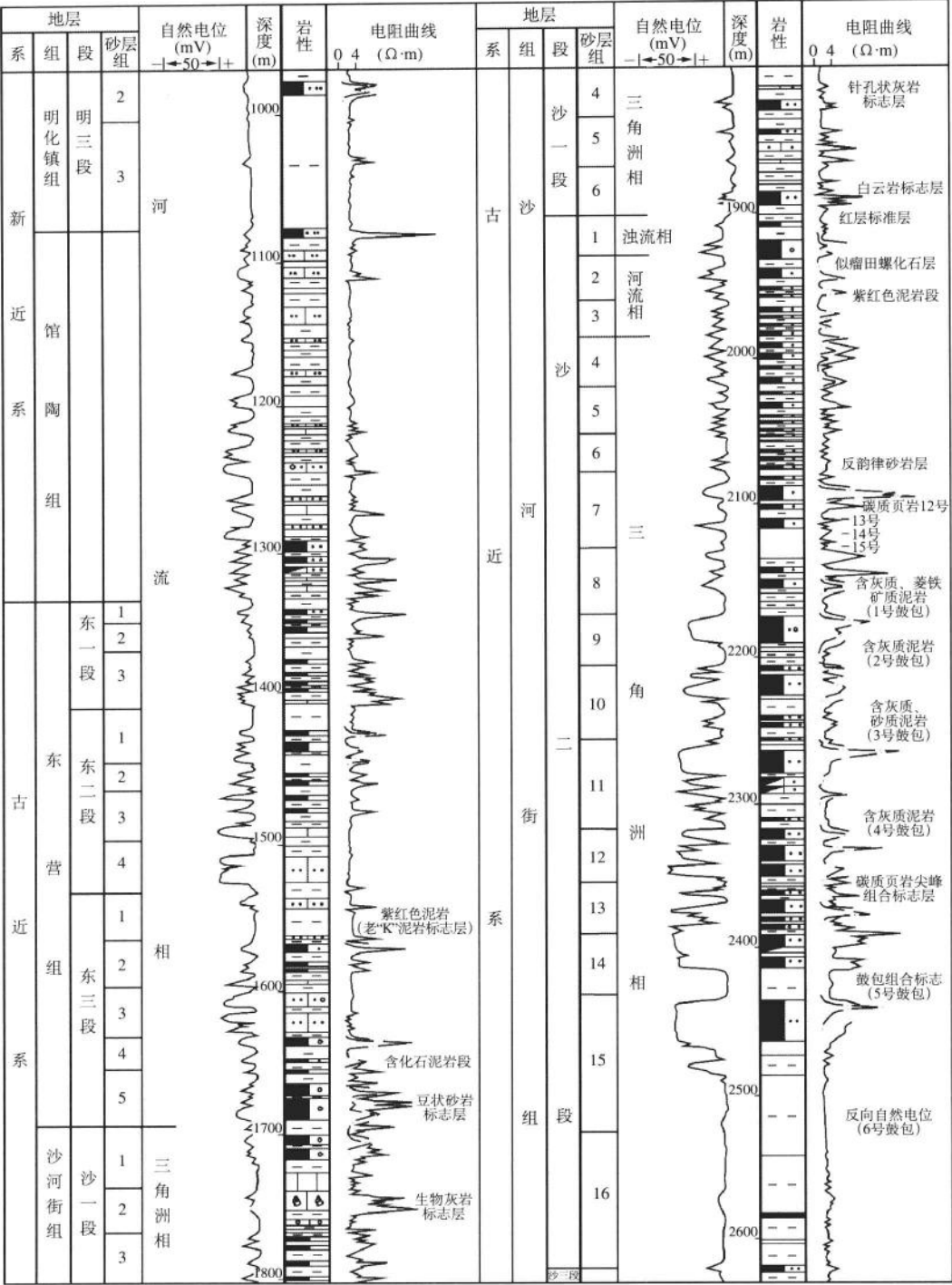


图 1-2 胜坨油田综合柱状图

在沙三段—沙二段沉积旋回期, 沉积物源供应充足, 湖水逐步后退, 湖盆萎缩, 沉积相由较深湖相演变到三角洲—河流相。

在沙一段—东营组沉积旋回期, 盆地再次沉降后又回返上升, 湖盆水体扩大后又减小, 沉积相则从湖相演变到三角洲相和河流相。东营组沉积末期, 盆地整体抬升, 使东营组顶部遭受不同程度的剥蚀, 东营组与上覆馆陶组之间为区域性不整合接触。

在馆陶组—明化镇组沉积旋回期, 整个盆地都为物源供应充足的河流沉积。

胜坨油田目前已发现有工业油流的含油气层系共有 7 套, 从下到上分别是: 沙四段油层、沙三段油层、沙二段油层、沙一段油气层、东营组油层、馆陶组油气层和明化镇组气层, 其中沙二段是胜坨油田主力含油层系, 而沙三段、沙四段是主要的生油层系。

二、地层特征

1. 沙四段沉积时期

沙四段下部为浅灰色、杂色、灰白色砂砾岩地层, 局部地区含少量膏盐, 为中—高电阻层。其厚度为 200 ~ 400m, 直接与下伏的震旦系、前寒武系花岗岩接触。沙四段中部为一套巨厚的浅灰色硬石膏层, 深灰色泥岩夹薄层灰黄色杂卤石, 与钙芒硝层呈互层出现, 介形虫化石少, 孢粉化石丰富, 为干旱气候条件下的化石组合。沙四段上部沉积一套厚约 250m 以上的灰质岩、泥页岩层。其上部的地层岩性为灰色泥岩、油页岩、灰质泥岩夹薄层白云岩、灰质粉砂岩, 白云岩中含油迹, 地层电阻率为中—高阻。沙四段沉积末在东营盆地发生一次较大规模的地壳运动, 表现为玄武岩喷发和辉绿岩浅层侵入, 断裂活动使部分地区地壳上升露出水面而受到风化剥蚀, 形成地层不整合。

沙四段沉积时期, 在胜坨油田北部陡坡带发育大量砂砾岩体, 目前已发现多个具有较高产能的砂砾岩油藏。

2. 沙三段—沙二段沉积时期

沙三段—沙二段沉积时期, 地层为湖相、三角洲相和河流相沉积, 是湖泊充填的过程。

沙三段沉积时期, 气候温暖, 雨量充足, 湖盆稳定沉降, 是湖泊发育最兴盛时期, 湖区面积最大。沙三下亚段地层岩性以深灰色、褐灰色湖相泥岩为主, 夹油页岩。沙三中亚段—沙三上亚段则以灰色、褐灰色泥岩为主, 夹不规则砂岩透镜体。总的来看, 该时期地层岩性主要为半深湖—深湖相暗色泥岩, 夹砂岩和大段油页岩。暗色泥岩厚达千米以上, 占该段地层总厚度的 79%。

沙三段是胜坨油田主要的生油层系, 底部油页岩段是区域标准层, 即地震第六反射层 (T_6)。

沙二段下部—中部沉积时期, 东营盆地整体向上抬升, 虽然气候潮湿, 雨量充沛, 但隆起区物源丰富, 河流携带大量陆源碎屑入湖形成三角洲, 从而导致湖水变浅、湖泊萎缩。随着三角洲不断向湖推进和扩大, 水系汇合, 三角洲连片, 形成多水系的复合三角洲。

沙二下亚段共划分了 8 个砂层组, 即沙二段 8 ~ 16 砂层组, 各砂层组地层呈反旋回特征, 其岩性上部为厚层或块状粉砂岩、细砂岩, 顶部偶夹薄层含砾、砾状砂岩; 下部为灰色、深灰色纯泥岩。泥岩段的中下部有一组含钙、含菱铁矿的深灰色泥岩, 比上、下泥岩的电阻率值略高, 微电极和感应电导率测井曲线特征明显, 俗称“鼓包”泥岩, 是各砂层组划分对比的标志层。沙二下亚段是胜坨油田二、三区主要含油层系, 其储量占油田总储

量的 30.4%。

沙二中亚段主要是指沙二段 4 ~ 7 砂层组。在该沉积时期,胜利村地区构造继续隆起,构造顶部沉积厚度为 115m,向翼部增厚到 175m。胜二区南部还明显受东辛构造的影响,地层较薄。胜一区仍是一个南倾斜坡,但此时接受了西北部的物源供给,沉积一套厚砂岩,在坨 49 井该砂岩厚达 120m,在构造顶部厚度也超过 90m。岩性为紫红色、灰绿色、灰黄色泥岩和细砂岩互层,砂岩呈透镜状分布,局部地区砂岩底部发育细砾岩。砂岩一般厚 2 ~ 4m,以正韵律沉积为主,具交错层理。该套地层发育多层碳质页岩,其电阻率曲线呈尖峰状,其中第 12 号、第 13 号、第 14 号 3 层碳质页岩分布较稳定,是沙二段 7 砂层组对比划分的标志。

沙二上亚段主要是指沙二段 1 ~ 3 砂层组。在该时期,由于气候干燥,湖盆收缩,湖水退缩于利津洼陷,东营凹陷大部分地区为河流沉积,靠近凹陷北缘近陡坡一侧,存在冲积扇沉积。沙二上亚段岩性为灰绿色、紫红色泥岩与灰色细砂岩、粗砂岩、含砾砂岩互层,部分砂岩底部有细砾岩。沙二上亚段沉积时期,胜坨地区构造已初具规模,地层沉积明显受断层活动的影响。胜三区顶部地层较薄,一般厚 70 ~ 75m,向翼部增厚到 118m。沙二上亚段砂岩总厚度一般在 25m 左右,平面上没有大的差异。单层砂岩一般厚 2 ~ 4m,最厚可达 10m。砂岩多为正韵律沉积,底部有冲刷面。沙二段 1 砂层组可见鲍马序列,沙二段 2 ~ 3 砂层组中有大型斜层理和交错层理。沙二上亚段具有 3 组标志层,从上到下依次为介形虫泥岩段、旋脊似瘤田螺化石组合段和紫红色泥岩段,这 3 组标志层的电性特征明显,是沙二上亚段各砂层组对比划分的依据。

3. 沙一段—东营组沉积时期

沙一段沉积时期,湖泊经历了 3 个发育阶段:早期,气候较沙二段沉积末期湿润,湖盆加深扩展,但水质仍较咸;中期,湖盆均衡下沉,湖面相对稳定,淡水补给充分,水质变淡,生物繁盛;晚期,陆源物质大量注入,湖盆萎缩,陆源碎屑沉积较为发育。

沙一段共分为 6 个砂层组。沙一段 4 ~ 6 砂层组为泥质白云岩段,该段上部以深灰色泥岩为主,夹 3 组薄层石灰岩;中部有 5 ~ 6 层白云岩、生物灰岩和鲕状灰岩;下部为深灰色泥岩夹黄灰色薄层泥质白云岩、灰白色白云岩,该白云岩在胜三区北部为含油砂岩。沙一段 3 砂层组以发育“针孔灰岩”为特征,该段顶部为一层鲕状生物灰岩和一组泥质、灰质粉砂岩;中部和下部为灰色泥岩夹两薄层灰岩,该石灰岩在胜二区为含油砂岩,而在胜一区则为气层;底部为灰白色针孔灰岩,厚约 2 ~ 3m,孔洞直径最大可达 2 ~ 3cm。针孔灰岩分布相对稳定,电性特征明显,是胜坨油田沙河街组地层对比的标准层。沙一段 1 ~ 2 砂层组以发育生物灰岩为特征。沙一段 1 砂层组是沙一段主要含油层,其上部为棕褐色含油细粉砂岩、灰白色灰质砂岩,俗称“豆状”砂岩,砂岩胶结疏松,分选较好;下部为灰色泥岩夹薄层灰岩及粉砂岩。沙一段 2 砂层组顶部为一组生物灰岩,生物碎片含量在 30% 左右,部分为鲕状灰岩。生物灰岩下面为一组灰白色泥质细砂岩,部分含砾。该组砂岩变化较大,是区域性标准层和地震第二反射层(T₂)。

东营组与下伏沙一段整合接触,从上到下共分为东一段、东二段和东三段。东营组早期继承沙一段晚期的三角洲沉积;中晚期盆地回返上升,主要为河流相沉积。东三段岩性主要为浅灰绿色泥质砂岩夹灰绿色含砂泥岩,以“豆状砂岩”为标志。东二段岩性为杂色、灰绿色砂质泥岩和砂岩不等厚互层,下部砂岩单层厚度较大,与东三段之间以紫红色泥岩(俗称老“K”泥岩)为界。东一段是胜三区东营组主力含油段,岩性主要为棕红、